

## MIKROZONASI SEISMIC DAN ANALISIS RESPON SITE SPECIFIC KOTA PALU

Harun Mallisa\*  
Gidion Turu'allo\*  
Zet Mallisa \*

### Abstract

Some experts have done researches and made seismic Hazard Maps of Indonesia according to their own way, this study presents research to obtain the Peak Ground Acceleration (PGA) for Palu city based on more complete data, systematically and try to reduce the uncertain factors in every step of the analysis which had been done.

Generally, this seismic hazard analysis covers collecting and processing seismic data, seismotectonic study and seismic hazard analysis. The seismic data covered from 1904 until 2006. The data was processed to obtain the main shock and the completeness. The logic tree using to consider the uncertainty factors from every calculation.

The shear wave propagation analysis from base rock to ground surface based on one-dimensional shear wave propagation theorem was performed by using Equivalent Linear Earthquake Response Analysis (EERA). Dynamic properties soils were obtained from collected soil investigation report around Palu city. The vary results of earthquake acceleration on the ground surface then plotted for seismic microzonation map of Palu city; while the results of site response analysis using EERA, programs were further used as input motion data for developing response spectra.

keywords : Seismic hazard analysis, response spectra.

### Abstrak

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian dan membuat Peta Gempa Indonesia dengan versi masing – masing, penelitian ini menyajikan penelitian untuk mendapatkan Peak Ground Acceleration (PGA) untuk beberapa tempat di Kota Palu berdasarkan metoda yang lebih lengkap, sistematis dan berusaha mengurangi faktor ketidak pastian dalam setiap langkah perhitungan yang dilakukan.

Penelitian ini akan meliputi pengumpulan dan pengolahan data gempa, studi seismotektonik dan analisis resiko gempa. Data-data gempa dikumpulkan dari tahun 1904 – 2006. Data gempa kemudian diolah sehingga didapat data gempa utama dan kelengkapannya. Untuk memperhitungkan faktor ketidak pastian dari masing - masing tahapan perhitungan dipakai metoda logic tree.

Analisis dilakukan dengan bantuan program Equevalent Linear Earthquake Respons Analysis (EERA). Properties dinamik tanah dievaluasi dari data-data hasil penyelidikan tanah yang dikumpulkan di beberapa tempat di Kota Palu. Hasil dari analisis respon site dengan menggunakan program EERA, dapat digunakan sebagai data masukan untuk pembuatan respon spectra.

**Kata Kunci :** Analisis resiko gempa, , respon spektra.

### 1. Pendahuluan

Besarnya aktivitas gempa bumi yang terjadi tentu saja akan mengakibatkan kerugian moril dan

materil yang cukup besar pula. Untuk mengurangi kerugian yang besar, maka perlu dilakukan studi kegempaan yang akurat serta membuat peraturan

---

\* Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

bangunan tahan gempa yang baik. Studi seismotektonik diperlukan untuk penentuan lokasi gempa, data-data tersebut kemudian diolah dengan menggunakan kaidah-kaidah statistik sebelum digunakan analisis resiko gempa.

Gempa bumi sebagai fenomena alam yang terjadi secara tiba-tiba dan sulit untuk diperkirakan dapat menyebabkan kerusakan struktur, sarana infrastruktur, pemukiman penduduk dan bangunan sipil lainnya yang memiliki arti penting dalam kehidupan suatu masyarakat dan negara. Kerusakan struktur yang terjadi sebagai akibat dari bencana gempa dapat disebabkan oleh tiga fenomena fisik, yaitu getaran tanah yang kuat, keruntuhan sesar di permukaan dan pengaruh sekunder seperti kelongsoran dan likuifaksi. Dari semua fenomena tersebut getaran tanah yang kuat dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang relatif besar karena umumnya meliputi kawasan yang cukup luas.

Dengan memperhatikan latar belakang dan permasalahan diatas, maka tujuan penulisan ini adalah:

- 1) Melakukan analisis untuk mendapatkan resiko gempa kota Palu, yaitu dengan memodelkan sumber-sumber gempa, menyeragamkan kelengkapan magnitudo gempa serta mengadakan pemisahan antara gempa utama dan gempa ikutannya.
- 2) Menganalisis perambatan gelombang geser satu dimensi (1-D) dengan metode linier ekuivalen yang menggunakan program *Equevalent Linear Earthquake Respons Analysis* (EERA).
- 3) Membuat respons spektra desain menurut (Anonim, 1997 dan Borchardt, 1994) yang akan dibandingkan dengan respons spektra yang dihasilkan oleh perambatan gelombang dengan program EERA dengan memakai gempa sintetik.

## 2. Tinjauan Pustaka

Geologi kota Palu disusun oleh tiga kelompok batuan yakni : kelompok batuan Pra – Tersier, kelompok batuan Tersier dan kelompok batuan Kuartar. Kelompok batuan Pra-Tersier dapat dijumpai berupa batuan sedimen laut dan berupa batuan metamorfik yang mana kedua batuan tersebut , dapat diterobos oleh batuan *granit* dan *granodiorit* yang sudah berumur tersier, serta tertindih yang tidak selaras oleh kelompok para batuan kuartar yaitu yang terdiri dari beberapa endapan, yakni : endapan rombakan, endapan sungai, endapan limbah banjir dan endapan alur sungai purba serta endapan kipas aluvium. Endapan pantai yang dapat berupa pasir pantai dan *fragmen* batuan banyak dijumpai di sekeliling teluk Palu.

Struktur sesar aktif yang banyak dijumpai disekitar lembah Palu adalah berarah Utara – Selatan sedang beberapa diantaranya yang berarah Baratdaya – Timurlaut. Sesar – sesar aktif tersebut yang berarah Utara – Selatan adalah merupakan sesar-sesar aktif akibat peremajaan dari struktur tua yang dapat teraktifkan kembali, sedangkan sesar-sesar yang berarah Baratdaya – Timurlaut adalah merupakan struktur yang sangat aktif pada masa kini. Kedua pola struktur geologi utama tersebut dapat pula diamati dari perubahan pada nilai *Anomali Bouguer* sisa yang mencolok (Hayat, 1999).Perpaduan pola struktur geologi tersebut inilah yang membentuk kota Palu yang kemudian diisi oleh endapan kuartar yang pada proses pengendapannya dapat memperlihatkan peristiwa penurunan.

Patahan lateral Sulawesi Tengah di bagian kiri. Sistem patahan ini, yang dibandingkan dengan dua daerah patahan, *Palu Koro Fault* (PKF) dan daerah *Matano Fault* (MF), berhubungan dari barat laut ke tenggara daerah subduksi Sulawesi Utara ke laut Banda. Penelitian-penelitian sebelumnya menyarankan tektonik aktif utama sepanjang sistim

patahan Sulawesi Tengah (Central Sulawesi Fault System, CSFS) khususnya sepanjang patahan Palu-Koro. Meskipun gempa Sulawesi menurut catatan gempa global, Indonesia dan sejarah gempa menunjukkan gempa aktif dangkal yang relatif rendah (Beaudouin, 1998). Bertolak belakang dengan tingkat gempa yang rendah ini, angka pergeseran PKF setinggi  $40 \pm 50$  mm pertahun untuk 10 tahun terakhir.

### 3. Metode penelitian

Untuk memudahkan pengontrolan dalam setiap tahapan analisis, maka dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu:

**Tahap 1:** Studi sismotektonik yaitu melakukan pengumpulan data, evaluasi dan identifikasi data geologi dan seismologi yaitu sesar-sesar yang aktif sampai sekarang dan dapat mempengaruhi kegempaan di lokasi penelitian, serta data kejadian gempa yang dapat mempengaruhi kota Palu dan sekitarnya.

**Tahap 2:** Pengumpulan data gempa dan pengolahan data-data tersebut. Tahapan ini terdiri dari:

- a. Pengumpulan data – data gempa terbaru, yang meliputi tahun kejadian, lokasi dan jarak episenter, kedalaman dan besarnya magnitude yang dihasilkan.
- b. Studi untuk mendapatkan korelasi empiris data-data skala magnitude yang meliputi penyetaraan skala magnitude yaitu semua data gempa yang ada dikonversi masuk kedalam satuan momen magnitude ( $M_w$ ).
- c. Pemisahan gempa utama dengan gempa ikutannya
- d. Analisis resiko gempa untuk wilayah kota Palu, yang meliputi pemodelan sumber gempa yang didasarkan pada model tektonik kemudian diinterpretasikan untuk kota Palu yang dibagi dalam 8 zona sumber gempa, penentuan parameter resiko gempa

**Tahap 3:** Menganalisis perambatan gelombang geser satu dimensi (1-D). Tahapan ini terdiri dari:

- a. Pembuatan respons spektra desain menurut Anonim, 1997 dan Borchardt (1994).
- b. Menganalisis perambatan gelombang geser satu dimensi (1-D) dengan menggunakan program EERA.

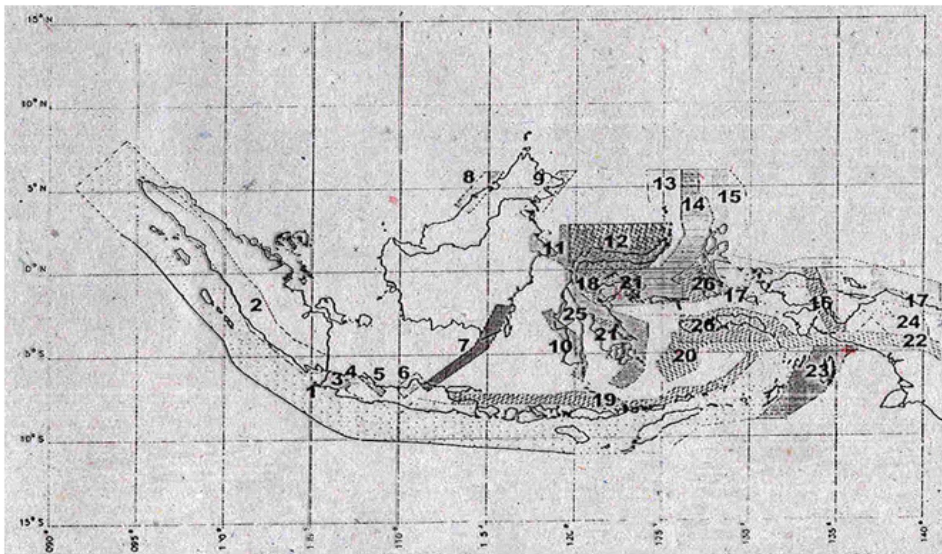
### 4. Hasil dan pembahasan

#### 4.1 Identifikasi dan Karakteristik sumber gempa

Dalam memodelkan zona-zona sumber gempa, Annaka dan Ohki (1992) telah memperkenalkan tiga model zona sumber yaitu:

- 1) Model yang disimplifikasi yaitu daerah yang akan di analisis dikotakkan menjadi beberapa zona sumber gempa dengan interval tertentu.
- 2) Model katalog gempa yaitu gempa bumi diasumsikan akan terjadi lagi tepat pada lokasi yang sama dengan data katalog.
- 3) Model tektonik yaitu zona sumber gempa ditentukan berdasarkan kombinasi antara data geologi dan sejarah kegempaan

Hasil analisis sensitivitas terhadap pemodelan sumber gempa ini menunjukkan bahwa perbedaan hasil analisis antara ketiga model tersebut akan semakin membesar berbanding lurus dengan semakin membesarnya PGA. Hasil analisis tersebut juga menunjukkan bahwa model tektonik akan memberikan hasil yang terbesar dibandingkan kedua model lainnya. Pada penelitian ini, pemodelan sumber-sumber gempa didasarkan pada model tektonik yang diinterpretasikan berdasarkan catatan sumber gempa yang diplotkan kedalam peta gempa di Indonesia yang merupakan usulan dari Firmansjah – Irsyam (1999), seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Zona sumber gempa Indonesia modifikasi dari Firmansjah – Irsyam (1999) dan Kertapati (1999).

Berdasarkan Gambar 1, zona sumber gempa yang mempengaruhi kegempaan wilayah Kota Palu secara detail adalah sebagai berikut: Sulawesi Utara, Palu-Koro, Walane, Lasem, Batui, Poso, Mamuju dan Sulu.

#### 4.2 Parameter resiko gempa

Karakteristik seismisitas suatu lokasi yang akan ditinjau umumnya dinyatakan dalam parameter resiko gempa. Parameter resiko gempa adalah parameter yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik aktivitas kegempaan dalam suatu wilayah. Parameter gempa yang dapat menggambarkan aktivitas tersebut diantaranya adalah parameter  $a$  dan  $b$  dari Gutenberg-Richter, frekuensi pengulangan (rate recurrence) dan magnitude maksimum.

Frekuensi kejadian gempa umumnya diasumsikan mengikuti hukum frekuensi magnitude dari Getenberg-Richter (G-R), yaitu:

$$\log N(m) = a - bm \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{atau } \ln N(m) = \alpha - \beta m \dots\dots\dots(2)$$

dengan  $\alpha = 2.303a$ ;  $\beta = 2.303b$

Metoda yang paling sederhana untuk mendapatkan harga  $b$  adalah dengan metoda *least square* (LS) dan *mean annual rate of exceedance* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Irsyam dan Handoyo (1997) berikut:

$$N(m) = \frac{v \exp(-\beta(m - m_0)) - \exp(-\beta(m_{\max} - m_0))}{1 - \exp(-\beta(m_{\max} - m_0))} \dots\dots\dots(3)$$

Pada persamaan 3 di atas  $v = \exp(\alpha - \beta m_0)$  dan magnitude yang digunakan berada pada rentang  $m_0 \leq m \leq m_{\max}$ .

#### a. Model Weichert (1980).

Prosedur ini sangat baik digunakan untuk sumber gempa dengan jumlah kejadian gempa yang cukup baik (sekitar 100 atau lebih) dimana

estimasi parameter a-b yang cukup stabil dapat ditentukan. Menurut perubahan ini,  $\beta$  diperoleh secara iteratif dengan menggunakan metode Newton (Tabel 2).

$$\frac{\sum_i t_i m_i \exp(-\beta m_i)}{\sum_i t_i \exp(-\beta m_i)} = \frac{\sum_i n_i m_i}{N} = m \quad \dots\dots\dots(4)$$

b. Model Kijko & sellevoll (1989).

Model ini menggunakan pendekatan yang berbeda sehingga mampu mengkombinasikan informasi makroseismik (gempa-gempa signifikan) dengan informasi gempa yang lebih lengkap (biasanya gempa-gempa yang tercatat selama 50 tahun terakhir) dalam suatu katalog.

Persamaan umum untuk memperoleh parameter  $\beta$  dan  $\lambda$  adalah sebagai berikut (Tabel 1) :

$$\frac{1}{\lambda} = \phi_1^E + \phi_1^C \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{1}{\beta} = \langle X \rangle - \phi_2^E - \phi_2^C + \lambda[\phi_3^E + \phi_3^C] \quad \dots\dots\dots(6)$$

Dalam studi ini, dilakukan penggabungan beberapa sumber gempa dengan mekanisme dan karakteristik yang sama untuk mendapatkan data gempa yang mencukupi.

#### 4.3 Magnitude maksimum

Magnitude maksimum yang dapat terjadi pada suatu daerah juga dapat diperkirakan dari struktur tektonik dan pergeseran tanah batuan. Magnitude maksimum untuk zona subduksi dapat diperkirakan berdasarkan harga *momen seismic*, yang dikombinasikan dengan formula dari Kanamori (1977) untuk mendapatkan momen magnitude dalam menghitung magnitude maksimum dalam penelitian ini digunakan besaran  $\mu = 4.0 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$  (Soetjiono, 1987). Selanjutnya hasil dari kedua metode di atas diambil yang paling besar yang kemudian dipakai dalam perhitungan (Tabel 3).

Tabel 1. Parameter resiko gempa dengan Metode Kijko dan Sellevoll (1989)

Zona	a	b	3	$\lambda(mo)$	mo	m max	Alokasi
Subduksi Sulawesi Utara	5.34	1.00	2.31	2.110	5.0	8.0	1.000
Interface	5.18	1.00	2.31	1.467	5.0	8.0	0.695
Intrslab	4.83	1.00	2.31	0.643	5.0	8.0	0.305
Sesar Palu-Koro	5.63	1.12	2.57	1.120	5.0	7.6	1.000
Palu-Koro - 1	4.77	1.12	2.57	0.153	5.0	7.6	0.136
Palu-Koro - 2	4.59	1.12	2.57	0.102	5.0	7.6	0.091
Palu-Koro - 3	4.99	1.12	2.57	0.255	5.0	7.6	0.227
Palu-Koro - 4	5.37	1.12	2.57	0.611	5.0	7.6	0.545
Diffuse seismicity	5.71	1.14	2.63	0.990	5.0	7.6	1.000
Batu	5.44	1.14	2.63	0.533	5.0	7.4	0.538
Poso	5.02	1.14	2.63	0.203	5.0	6.5	0.205
Mamuju	4.96	1.14	2.63	0.178	5.0	7.6	0.179
Sulu	4.59	1.14	2.63	0.076	5.0	6.0	0.077
Background	3.33	0.93	2.14	0.046	5.0	6.0	1.000

Tabel 2. Parameter resiko gempa dengan Metode Weichert (1980)

Zona	a	b	$\beta$	$\lambda(mo)$	mo	m max	Alokasi
Subduksi Sulawesi Utara	5.38	1.00	2.31	2.333	5.0	8.0	1.000
Interface	5.22	1.00	2.31	1.622	5.0	8.0	0.695
Intraslab	4.86	1.00	2.31	0.711	5.0	8.0	0.305
Sesar Palu-Koro	5.05	1.00	2.29	1.187	5.0	7.6	1.000
Palu-Koro - 1	4.19	1.00	2.29	0.162	5.0	7.6	0.136
Palu-Koro - 2	4.01	1.00	2.29	0.108	5.0	7.6	0.091
Palu-Koro - 3	4.41	1.00	2.29	0.270	5.0	7.6	0.227
Palu-Koro - 4	4.79	1.00	2.29	0.648	5.0	7.6	0.545
Diffuse seismicity	4.06	0.82	1.89	0.907	5.0	7.6	1.000
Batui	3.79	0.82	1.89	0.488	5.0	7.4	0.538
Poso	3.37	0.82	1.89	0.186	5.0	6.5	0.205
Mamuju	3.31	0.82	1.89	0.163	5.0	7.6	0.179
Sulu	2.95	0.82	1.89	0.070	5.0	6.0	0.077
Background	2.87	0.84	1.93	0.047	5.0	6.0	1.000

Tabel 3. Magnitude maksimum setiap zona (Firmansjah, 1999 dan Kertapati, 1999)

Klasifikasi	Sumber gempa	Magnitude max.
Zona Subduksi	1. Sulawesi Utara	8.0
Zona Transformasi	2. Palu-Koro	7.6
	3. Walanae	6.3
	4. Lasem	6.0
Zona Diffuse Seismicity	5. Batui	7.4
	6. Poso	6.5
	7. Mamuju	7.6
	8. Sulu	6.0

#### 4.3 Analisis perambatan gelombang geser satu dimensi

Metode yang digunakan dalam analisis perambatan gelombang geser satu dimensi adalah dengan metoda linier ekuivalen.

Asumsi dasar yang digunakan dalam metode linier ekuivalen ini adalah :

- 1) Sistim tanah mempunyai panjang yang tidak terbatas dalam arah horizontal.
- 2) Setiap lapisan dalam sistim didefinisikan secara lengkap oleh parameter-parameter modulus geser, damping ratio, density dan ketebalan. Nilai-nilai pada parameter

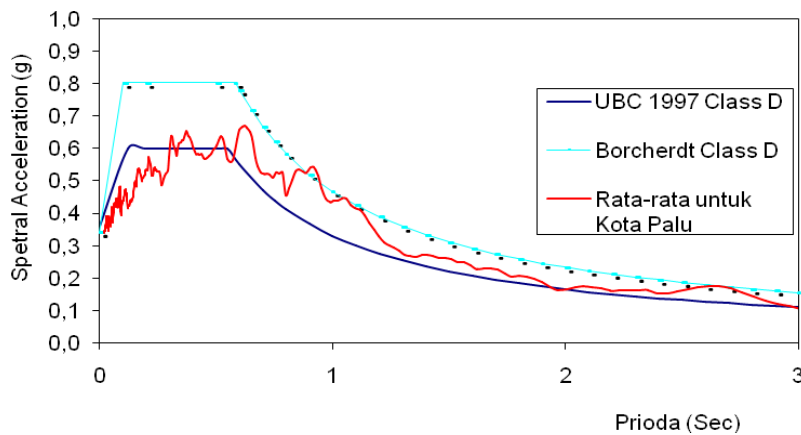
tersebut tidak dipengaruhi oleh frekuensi.

- 3) Respons yang terjadi pada sistem disebabkan oleh rambatan ke atas gelombang geser dari lapisan batuan dasar.
- 4) Gelombang geser dalam bentuk percepatan dengan interval waktu yang sama.
- 5) Regangan yang bergantung pada modulus geser dan damping dihitung dengan menggunakan prosedur linier ekuivalen berdasarkan tingkat regangan efektif rata-rata dari setiap lapisan.

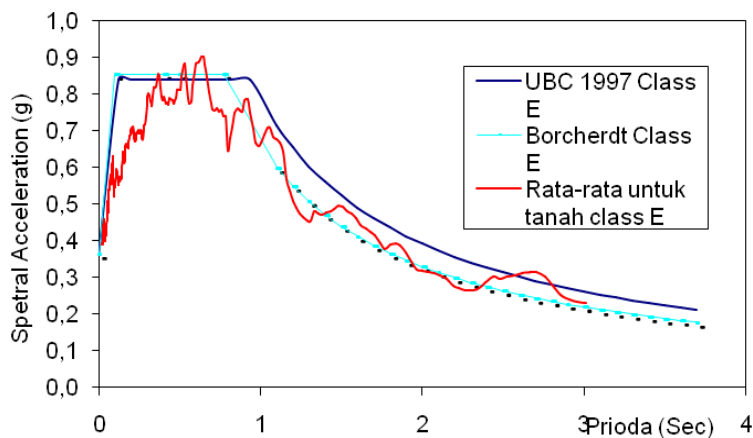
Dalam studi ini, analisis perambatan gelombang 1-D menggunakan program EERA, pada

program ini prinsip pembuatan input dan interpretasi output sangatlah sederhana, sehingga mudah dimengerti dan hasil output yang berupa grafik langsung dapat dibaca. Untuk studi ini respons spektra pada permukaan tanah hasil perambatan gelombang untuk tipe tanah kelas  $S_D$  dan jenis tipe tanah  $S_E$  di beberapa tempat lokasi untuk kota Palu

dengan menggunakan data gempa El-Centro dibandingkan dengan respons spektra desain menurut (Anonim, 1997 dan Borchardt, 1994) dapat dilihat pada Gambar 2 sampai dengan Gambar 3. Respons spektra tersebut terlihat bahwa umumnya relatif sama jika dibandingkan dengan respons spektra standar.



Gambar 2. Perbandingan respons spektra permukaan rata-rata kelas  $S_D$  dengan respons spektra desain.



Gambar 3. Perbandingan respons spektra permukaan rata-rata kelas  $S_E$  dengan respons spektra desain.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi analisis resiko gempa kota Palu maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

- 1) Tingginya tingkat resiko gempa di kota Palu sangat dipengaruhi oleh adanya sumber gempa subduksi Sulawesi Utara dan sumber gempa patahan Palu-Koro.
- 2) Variabel-variabel yang mempengaruhi hasil analisis pada perambatan gelombang geser 1-D adalah parameter dinamik tanah, seperti nilai geser  $G_{max}$ , *damping ratio* ( $\xi$ ) dan kecepatan gelombang ( $V_s$ ) serta data riwayat waktu yang digunakan yaitu data catatan gempa El-Centro.
- 3) Berdasarkan analisis terhadap beberapa data hasil penyelidikan tanah di kota Palu dapat disimpulkan bahwa penggunaan standar perencanaan bangunan tahan gempa untuk kedua jenis tanah yang ada di kota Palu baik untuk digunakan.

## 6. Daftar Pustaka

- Anonim, 1997, " Uniform Building Code (UBC 97) ", Vol. 2, International Conference of Building Officials.
- Bardet, J.P. dan Tobita, T., 2001, "Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits" Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Borcherdt, R. D., 1994, "Estimates of Site-Dependent Response Spektra for Design Methodology and Justification)", *Earthquake Spectra*, 10 (4):83-90
- Dong, W.M., Bao, A.B., dan H.C., Shah 1984, Use of Maximum Entropy Principle in Earthquake Recurrence Relationship, *Bulletin of the Seismological Society of Amerika* 74 (2): 725-737.
- Firmansjah, J., dan Irsyam, M., 1999, "Development of Seismic Hazard Map for Indonesia", Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan di Indonesia, ITB, Bandung.
- Gasparini D.A., dan E.H., Vanmacke, 1976, "SIMQKE (User's manual and Documentation) Dept. of Civil Eng. Massachusetts Institute of Technology".
- Guttenberg, B., dan Richter, C.F, 1954 "Seismicity of the Earth," Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Hayat, D.Z., 1999, Detail Gravity Research of Palu and the Surrounding Area: Geological Research and Development Centre.
- Hidayat, S. dan Mochtar, H., 1999, Subsurface Quaternary Deposit of Palu Basin its Implication to the Earthquake Hazard: Geological Research and Development Centre.
- Irsyam, M., dan A., Handoyo, 1997, "Peran Geologi Dalam Mitigasi Gempa Tektonik Terhadap Kerusakan Bangunan", Seminar Sehari Peran Geologi Pertambangan Dalam Menunjang RTRW DKI Jakarta Menuju Kota Jasa Pada Era Globalisasi, Pemerintah Daerah Khusus DKI Jakarta, September.
- Kertapati, E. 1999, Probabilistic Estimates of The Seismic Ground Motion Hazard in Indonesia, *Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan*, p. I-1 ~ I-16.
- Kijko, A. dan M.A. Selevol, 1989, "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files Part I. Utilization of Extreme and Complete Catalog with Different Threshold Magnitudes", *BSSA*, 79 (3): 645-654.



- Kramer, 1996, "Geotechnical Engineering Earthquake", Prentice-Hall inc. Upper Saddle River, New Jersey.
- Soetjiono, C., 1987, "Earthquake Loading for Earthquake Resistant Design of Dam in Indonesia".
- Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J., dan Humphrey, J.R., 1997, "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquake," *Seismological Research Letters*, 68 (1): 58-74.